

DOI: 10.15593/2224-9826/2015.1.03

УДК 624.13

**Л.Ю. Колегова, В.Г. Офрихтер**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Пермь, Россия

## **МЕТОД СОКРАЩЕНИЯ СРОКОВ КОМПРЕССИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ ГРУНТОВ**

Выявлена необходимость в ускорении лабораторных испытаний грунтов, в частности испытаний компрессионного сжатия. В настоящее время проводятся различные виды компрессионных испытаний, в зависимости от типа решаемой инженерной задачи. Наиболее распространенные в нашей стране испытания проводятся по стандартному методу, описанному в ГОСТ 12248–2010 «Грунты. Методы лабораторного определения прочности и деформируемости», который имеет ряд недостатков. Также учеными предложен ускоренный метод компрессионных испытаний – метод релаксации напряжений. Метод релаксации грунта не описан в государственных стандартах, однако представлен в патенте А.Н. Труфанова «Метод релаксации напряжений Труфанова» или «Способ лабораторного определения деформационных характеристик грунтов» (действующий патент № 2272101), также на основе своих разработок сотрудники ООО «Новосибирский инженерный центр» разработали прибор – автоматический компрессионный релаксометр АКР-2. В статье приведены основные отличия данных компрессионных испытаний, рассмотрены достоинства и недостатки методов лабораторных испытаний грунтов. В настоящее время методика релаксации напряжений не представлена в государственном стандарте. Поэтому возникает необходимость проведения испытаний для внедрения этой методики в практику инженерно-геологических испытаний.

**Ключевые слова:** компрессионное сжатие, релаксация, стабилизация напряжений, метод релаксации напряжений, компрессионная кривая.

**L.Iu. Kolegova, V.G. Ofrikhter**

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

## **METHOD OF REDUCING THE TIME COMPRESSION TESTING OF SOILS**

There is need to accelerate the laboratory testing of soils, in particular, test compression ratio. Currently, various types of compression performed tests, depending on the type of engineering task solved. The most common method of compression tests of soils is a test of the soil sample during loading stages, with a rest to stabilize the vertical deformation. These tests last from several days to weeks, sometimes months. Devices with loading at a constant strain rate, or the method of stress relaxation tests allow to reduce the time (up to several hours). The most common in our country tests are carried out according to the standard method described in State Standard 12248–2010 “Soils. Laboratory methods for determining the strength and strain”, which has a number of drawbacks. Just scientists have proposed an accelerated method of compression test – a method of stress relaxation. Relaxation method is not described in the ground state standards. And submitted to the Patent A.N. Trufanov

"method of stress relaxation" or "Process laboratory determination of deformation characteristics of soils" (valid patent № 2272101), and on the basis of its development staff of "Novosibirsk Engineering Center" developed device – automatic compression relaxometer AKR-2. The article presents the main differences between the data compression test, considered the advantages and disadvantages of methods of laboratory testing of soils. Currently, the method of stress relaxation is not represented in the state standard. Therefore there is a need for testing for the introduction of this technique in practice geotechnical testing. Relaxation tests can significantly reduce the time needed to obtain the necessary data to determine the rheological parameters of the soil.

**Keywords:** confined compression, relaxation, voltage regulation, method stress relaxation, compression curve.

Одними из основных испытаний грунтов являются компрессионные испытания. В настоящее время основным методом таких испытаний является стандартная методика, описанная в ГОСТ 12248–2010 «Грунты. Методы лабораторного определения прочности и деформируемости». Компрессионные испытания по классическому методу делятся значительное количество времени, в зависимости от программы, поэтому возникает необходимость сократить время их проведения.

Вначале рассмотрим особенность компрессионных испытаний. Под действием внешней нагрузки без возможности бокового расширения в грунте происходит процесс уплотнения, при этом образец грунта переходит в напряженное состояние. Такой процесс сжатия без возможности бокового расширения называется компрессией. Осуществляется переход групп зерен из неустойчивого состояния в более устойчивое, в результате чего происходит падение напряжения в грунте, так называемый процесс стабилизации напряжения [1].

Впервые описание процесса стабилизации напряжения в грунте при однократном нагружении приводит в своей монографии Карл Терцаги (1933 г.). «При возрастании давления, действующего на массу, зерна смешаются, причем возрастание давления воспринимается добавочным сопротивлением трения, возникающим при сдвигении зерен. Вызванное возрастанием давления перемещение вследствие краткости времени, в которое происходит процесс повышения давления, можно рассматривать лишь как первое или предварительное приспособление зерен к изменившимся условиям равновесия. Если мы прервем дальнейшее сжатие массы, то движения приспособления зерен продолжаются, причем движение каждого отдельного зерна влечет за собой движение всех остальных зерен. Возникающий при этом переход зерен из неустойчивого положения в устойчивое вызывает уменьшение сил трения, необходимых для поддержания равновесия, и, следовательно, интенсивность внутреннего напряжения уменьшается» [2].

Процесс стабилизации пропорционально связан с уменьшением пористости грунта и увеличением плотности. К. Терцаги приводит картину связи между давлением и соответствующим изменением формы грунта, т.е. коэффициентом пористости: «Переход группы зерен из неустойчивого состояния в более устойчивое сопровождается уменьшением объема пор в области этой группы. Следовательно, стабилизация неустойчивых групп зерен идет рука об руку с увеличением плотности, откуда можно заключить, что число неустойчивых комбинаций и с ним сжатие, производимое однократным накладыванием данной нагрузки, находятся в обратном отношении к плотности нагруженного материала» [2].

Эту характерную зависимость между давлением и коэффициентом пористости Н.А. Цытович называет законом Терцаги, что в практике применяется для расчета осадок фундаментов и определения капиллярного давления. Зависимость между давлением и коэффициентом пористости называется *компрессионной зависимостью*, графически изображается в виде кривой (рис. 1), которая может быть установлена для любых грунтов: сыпучих и связных, а также для всех пористых материалов [3].

Компрессионная кривая имеет две ветви: первая получается при возрастании нагрузки на грунт ступенями и называется кривой уплотнения и вторая – при разгрузке образца и называется кривой набухания. Процесс набухания включает в себя увеличение содержания воды в связи с возрастанием объема пустот [4].

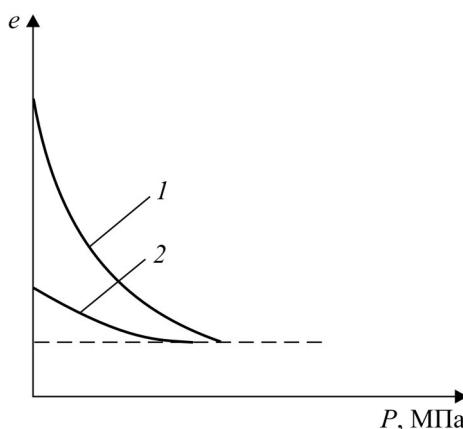


Рис. 1. Компрессионная кривая:  
1 – кривая уплотнения; 2 – кривая набухания

На практике при помощи компрессионных испытаний определяются физические характеристики деформируемости грунтов:

- 1) коэффициент сжимаемости  $m_0$ ;
- 2) модули деформации  $E_{oed}$  и  $E_d$  для ветвей первичного и повторного нагружения;
- 3) коэффициенты фильтрационной и вторичной консолидации  $c_\vartheta$  и  $c_\alpha$  для песков мелких и пылеватых, глинистых грунтов, органо-минеральных и органических грунтов.

Модуль деформации грунта является важным показателем его деформационных свойств, характеризующим уплотняемость грунта при нагружении. Он используется при расчете осадок сооружений на грунтовых основаниях [5].

Характеристики определяются по результатам испытаний грунта в компрессионных приборах – одометрах. Схема одометра представлена на рис. 2.

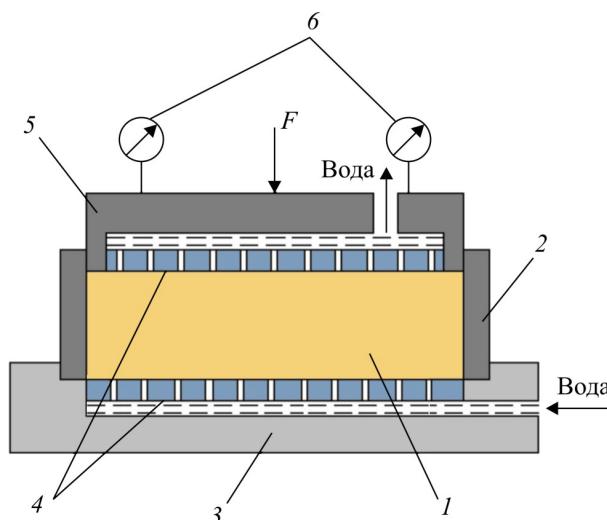


Рис. 2. Схема одометра компрессионного прибора: 1 – образец грунта; 2 – рабочее кольцо; 3 – поддон для воды и перфорированного вкладыша под кольцо; 4 – перфорированный поршень; 5 – штамп; 6 – индикатор для измерения вертикальных деформаций образца грунта

В настоящее время проводятся различные виды компрессионных испытаний, в зависимости от типа решаемой инженерной задачи. В монографии Г.Г. Болдырева «Методы определения механических свойств грунтов. Состояние вопроса» приведены основные типы компрессионных приборов, методы испытаний грунтов в этих приборах и их особенности (табл. 1) [6].

Таблица 1

Типы компрессионных приборов

Тип компрессионного прибора	Методы испытаний	Особенности
Прибор со статическим нагружением	ГОСТ 12248–96 ASTM D2435	Измерение вертикальной деформации и нормального давления
Прибор с постоянной скоростью деформации	ASTM D4186	Изменение порового давления Изменение скорости волны сдвига
Прибор с изменением релаксации напряжений (А.Н. Труфанов, патент № 2272101)	Релаксация напряжений Stress relaxation	Создание обратного давления Изменение давления набухания
Приборы с измерением боковых напряжений	—	Дополнительно к предыдущему – измерение боковых напряжений
Компрессионно-фильтрационные приборы	ГОСТ 12248–96	Измерение проницаемости грунтов

Наиболее распространенным методом компрессионных испытаний грунтов является испытание образца грунта при нагружении ступенями, с выдерживанием до стабилизации вертикальной деформации. Такие испытания делятся от нескольких дней до недель, иногда и месяцев. Приборы с нагружением с постоянной скоростью деформации или по методу релаксации напряжений позволяют сократить сроки испытаний (до нескольких часов).

Рассмотрим подробнее распространенные в нашей стране испытания по стандартному методу, описанному в ГОСТе, и метод стабилизации деформаций по степени релаксации напряжений.

Стандартное испытание грунта методом компрессионного сжатия проводят по ГОСТ 12248–2010 «Грунты. Методы лабораторного определения прочности и деформируемости».

Метод испытаний заключается в следующем. На образец грунта подается заданная нагрузка с помощью подвижного штампа в одометре, в образце грунта под воздействием внешней нагрузки возникают напряжения. В компрессионном приборе давление подается на образец постоянно до тех пор, пока не будет достигнута условная стабилизация образца (приращение относительной деформации  $\xi \leq 0,01$  в течение 4–16 ч, в зависимости от типа грунта).

Также учеными предложен ускоренный метод компрессионных испытаний – метод релаксации напряжений.

Наряду с изучением течения вязких сред начиная с XIX в. исследовалось деформирование во времени твердых тел. Впервые развитие деформации твердого тела во времени было отмечено Виком в 1834 г. и Вебером в 1835 г. Проводя опыты по растяжению волокон кварцевового стекла и шелковых нитей, Вебер наблюдал, что вслед за мгновенной упругой деформацией, возникающей сразу после приложения нагрузки, происходило дальнейшее удлинение волокна, развивающееся во времени. После же удаления нагрузки деформация восстановливалась также во времени. Явление запаздывания развития деформации было названо упругим последействием [7].

Развивая работы Вебера, Кольрауш в 1847 г. показал, что изменяться во времени может и напряжение, если сохранить постоянной возникшую деформацию. Это явление было названо им последействием напряжения. Позднее явление расслабления во времени напряжения, необходимого для поддержания постоянной деформации, получило название релаксации напряжений. Теория релаксации была разработана Максвеллом и изложена в его известной книге «О динамической теории газов» (1868) [7].

Под релаксацией (от латинского *relaxation* – ослабление) понимают процесс постепенного перехода при длительном действии нагрузки упругой деформации в пластическую (необратимую остаточную). Подобное явление означает понижение с течением времени в деформированном материале предела упругости, т.е. его расслабление [8].

Явление релаксации напряжений можно объяснить на модели упруго-вязкой жидкости Максвеля, или модели релаксирующего тела (рис. 3).

Модель представляет собой соединение «упругих и вязких элементов (моделей Гука и Ньютона)» [9].

В первое мгновение, после приложения некоторой силы  $P$ , «произойдет растяжение пружины 1 (деформация будет носить чисто упругий характер). Если концы растянутой модели закрепить, т.е. поддерживать деформацию постоянной, то поршень в амортизаторе 2 начнет мед-

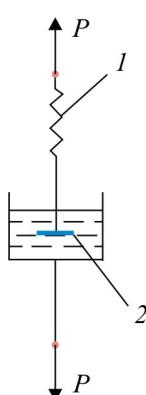


Рис. 3. Модель релаксирующего тела Максвеля: 1 – пружина; 2 – поршень в амортизаторе

ленно двигаться вверх, и одновременно длина пружины будет сокращаться за счет исчезновения в ней упругого удлинения. В конце концов пружина примет первоначальный размер, и усилие в ней исчезнет. Поршень сдвинется на соответствующее расстояние и тоже остановится, раз прекратится действие на него усилия со стороны пружины. Следовательно, общая деформация сохранится, а напряжения в теле исчезнут» [9].

Описание процесса релаксации напряжений как проявления упруго-вязких свойств тела также приводит в своей монографии С.С. Вялов.

Предположим, что мы испытываем балку из упруго-вязкого материала на изгиб. Под воздействием постоянной силы  $F$  в балке возникает прогиб  $f$ , развивающийся во времени по некоторому закону  $f(t)$ , т.е. по законам последствия. Если мы захотим, чтобы начиная с некоторого момента времени, принимая его за нулевой отсчет  $t = 0$ , нарастание прогиба прекратилось и он сохранял постоянное значение  $f_0 = \text{const}$ , то очевидно, что для этого нужно уменьшить силу  $F$  по некоторому закону  $F(t)$ . Уменьшение во времени напряжения, необходимого для поддержания постоянной деформации, и называется релаксацией напряжения [8].

Релаксация является следствием перераспределения упругой и пластической деформации. Действительно, суммарная деформация упруго-вязкого тела складывается из упругой ( $e$ ) и вязкой, остаточной ( $p$ ) частей:

$$\gamma_i = \gamma_i^e + \gamma_i^p. \quad (1)$$

Поскольку деформация  $\gamma_i^p$  возрастает во времени, то для соблюдения условий  $\gamma_{i(0)} = \text{const}$  должно уменьшаться  $\gamma_i^e$ ; с учетом того, что  $\gamma_i^e = \tau_i / G$ , указанное условие принимает вид

$$\gamma_{i(0)} = \tau_i / G + \gamma_i^p. \quad (2)$$

Отсюда следует, что постоянство деформаций  $\gamma_{i(0)} = \text{const}$  обеспечивается за счет уменьшения во времени напряжения  $\tau_i = \tau_i(t)$ .

Испытания на релаксацию заключаются в задании на образце некоторой начальной деформации  $\gamma_{i(0)}$ , которой соответствует начальное напряжение  $\tau_{i(0)}$  [9].

Испытания на релаксацию заключаются в следующем: «образцу задается некоторая начальная деформация, которой соответствует начальное напряжение. Затем, когда эта деформация тем или иным путем сохраняется постоянной, замеряют напряжение, изменяющееся во времени» [8].

К образцу грунта с начальным напряжением  $\sigma_0$  прикладывается нагрузка, образец деформируется и в нем возникает определенное напряжение  $\sigma_1$ . Напряжение измеряется датчиками и при уменьшении до некоторого начального значения  $\sigma_2$  происходит релаксация напряжения в грунте (рис. 4).

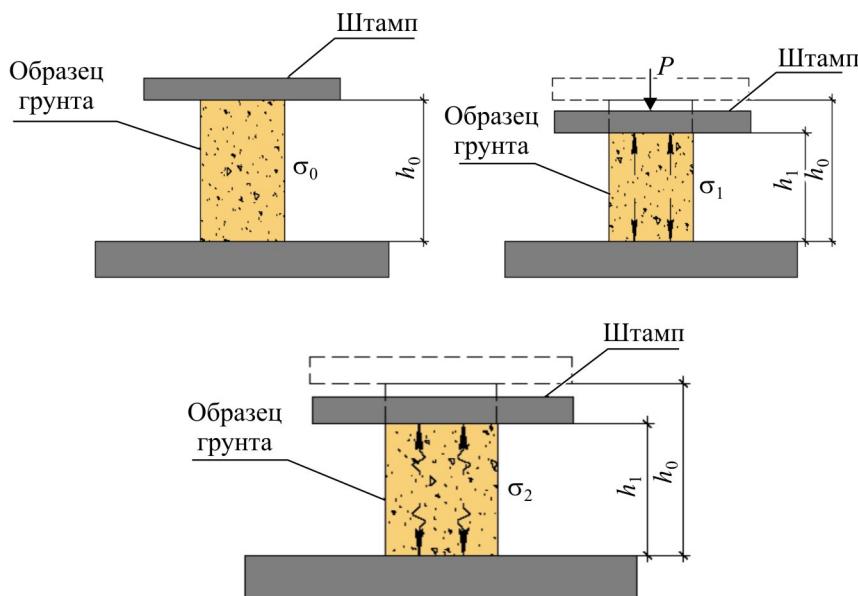


Рис. 4. Релаксация напряжений в грунте:  $\sigma_0$  – начальное напряжение;  $\sigma_1$  – напряжение, возникающее при прикладывании нагрузки  $P$ ;  $\sigma_2$  – значение напряжения в грунте после релаксации напряжения

Метод релаксации грунта не описан в государственных стандартах, однако представлен в следующих разработках:

1. Патент А.Н. Труфанова «Метод релаксации напряжений Труфанова» или «Способ лабораторного определения деформационных характеристик грунтов» (действующий патент № 2272101).
2. Прибор – автоматический компрессионный релаксометр АКР-2, созданный сотрудниками ООО «Новосибирский инженерный центр» на основе собственных разработок.

На основе метода релаксации напряжений в грунте А.Н. Труфанова разработан стандарт организации СТО 60284311-003–2012 «Грунты. Метод компрессионных испытаний грунтов в режиме релаксации напряжений», который находится в открытом доступе.

По данному методу на образец грунта прикладывается некая нагрузка, чтобы придать образцу определенную деформацию, равную рекомендованному значению деформирования для различных грунтов, в зависимости от коэффициента пористости (рис. 5).

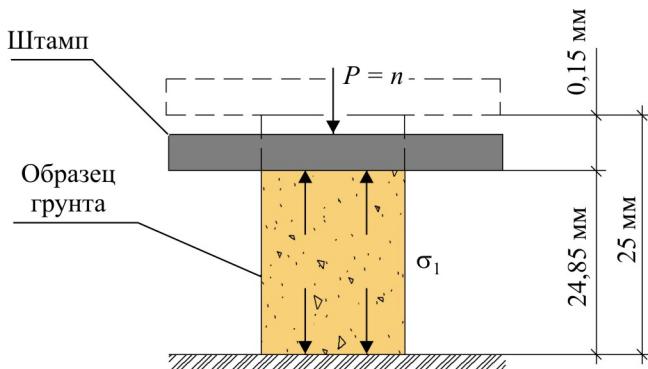


Рис. 5. Релаксация напряжений в грунте по методу  
релаксации напряжений А.Н. Труфанова

Допустим, что для песков гравелистых с коэффициентом пористости 0,55 ступень деформирования будет равной 0,15 мм (табл. 2).

Таблица 2

Рекомендуемые значения ступеней деформирования  
для песчаных грунтов  $n_i$ , мм\*

Наименование песчаного грунта	Коэффициент пористости $e$ , ед.			
	0,45	0,55	0,65	0,75
Пески гравелистые, крупные, средней крупности, мелкие	0,10	0,15	0,15	0,20
Пески пылеватые	0,15	0,20	0,30	0,35

\*СТО 60284311-003–2012 «Грунты. Метод компрессионных испытаний грунтов в режиме релаксации напряжений».

После деформирования образца заданной ступенью в процессе релаксации напряжений фиксируют отсчеты по устройствам для изменения напряжений и вертикальной деформации. При этом после каж-

дого снятия отсчета рассчитывается скорость изменения напряжения  $v$ . Завершением этапа релаксации является снижение скорости изменения напряжений до значений, указанных в табл. 3.

Таблица 3

Скорость условной стабилизации напряжений для различных видов грунтов  $v_s^*$

№ п/п	Грунты	Скорость условной стабилизации напряжений, МПа/мин
1	Пески	0,07
2	Глинистые грунты супеси	0,002
3	суглинки с $I_p < 12\%$	0,001
4	суглинки с $I_p \geq 12\%$	0,0005
5	глины с $I_p < 22\%$	0,0005
6	глины с $I_p \geq 22\%$	0,0003

\*СТО 60284311-003-2012 «Грунты. Метод компрессионных испытаний грунтов в режиме релаксации напряжений».

В приборе АКР-2 на образец грунта прикладывается нагрузка, задаваемая в программе испытаний, – 0,05; 0,1; 0,15; 0,2 МПа. После каждой ступени в грунте релаксируются напряжения до некоторого значения и прикладывается следующая нагрузка (рис. 6). Затем строится компрессионная кривая (рис. 7) и находится деформация грунта в зависимости от первоначальных ступеней нагрузки.

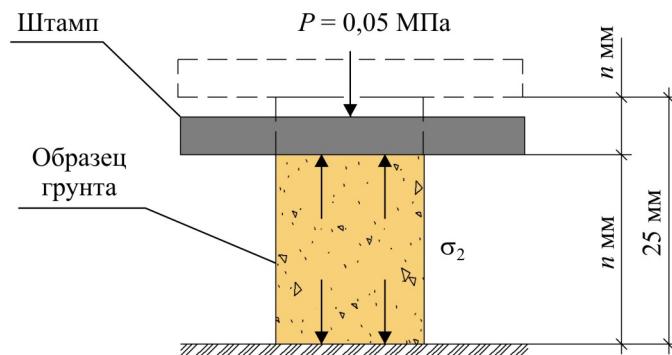


Рис. 6. Релаксация напряжений в грунте по методу релаксации напряжений, используемому в приборе АКР-2

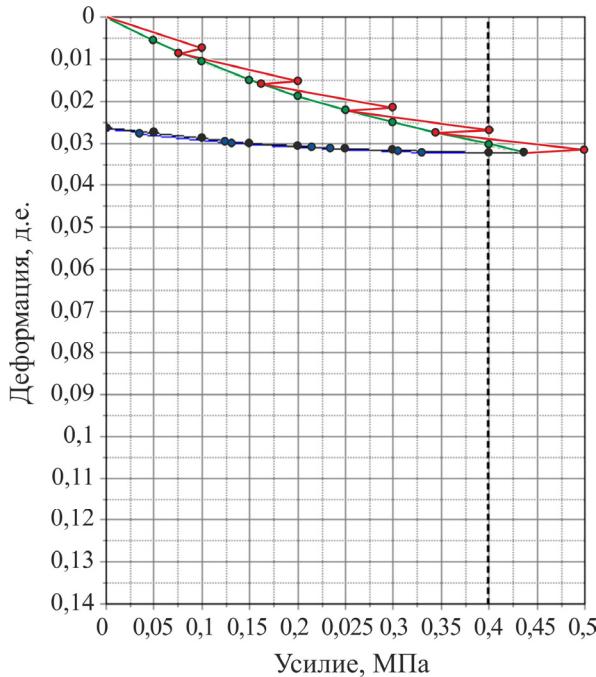


Рис. 7. Компрессионная кривая. Прибор АКР-2

В настоящее время методика релаксации напряжений не представлена в государственном стандарте. Поэтому возникает необходимость проведения испытаний для внедрения этой методики в практику инженерно-геологических испытаний [10].

Релаксационные испытания позволяют значительно сократить сроки получения необходимых данных для определения реологических параметров грунта.

Для сравнения и анализа результатов испытаний в дальнейшем будут проводиться испытания по классическому методу и методу релаксации напряжений.

При испытании по стандартной методике ГОСТа используется измерительно-вычислительный комплекс «АСИС-1».

*Достоинствами стандартных компрессионных испытаний являются простота и дешевизна испытаний.*

*Недостаток компрессионных испытаний – большая продолжительность испытаний – от нескольких часов (пески, супеси) до нескольких суток (суглинки, глины).*

При испытании грунтов по МРН используется релаксометр АКР-2, разработанный и изготовленный в ООО «Новосибирский инженерный центр».

*Преимущества релаксационного прибора:*

- сокращение продолжительности экспериментов по сравнению с традиционными методами при сохранении точности определения ис-комого параметра;
- прибор выполнен в автономном настольном варианте, мало чувствителен к динамическим воздействиям и наклону поверхности в местах установки прибора;
- прибор прост в обращении, испытания осуществляются без участия экспериментатора.

### **Библиографический список**

1. Ponomarev A., Sychkina E. Settlement Prediction of Foundations on Argillite-Like Soils (as Exemplified by the Perm Region) // Soil Mechanics and Foundation Engineering. – 2014. – 51 (3). – P. 111–116. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11204-014-9263-y>
2. Терцаги К. Строительная механика грунта на основе его физических свойств / под ред. и с прим. проф. Н.М. Герсеванова. – М.: ГОССТРОЙИЗДАТ, 1933. – 393 с.
3. Цытович Н.А. Механика грунтов: учеб. для строит. вузов. – Ленинград: Гос. изд-во строит. лит., 1940. – 389 с.
4. Terzaghi K. Theoretical soil mechanics. – New York, 1933. – 510 p.
5. Ухов С.Б. Механика грунтов, основания и фундаменты: учеб. пособие для строит. спец. вузов. – М.: Высш. шк., 2002. – 566 с.
6. Болдырев Г.Г. Методы определения механических свойств грунтов. Состояние вопроса: моногр. – Пенза: ПГУАС, 2008. – 696 с.
7. Тер-Мартиросян З.Г. Реологические параметры грунтов и расчеты оснований сооружений. – М.: Стройиздат, 1990. – 200 с.
8. Гольштейн М. Н. Механические свойства грунтов. – М.: Изд-во лит. по строительству, 1971. – 368 с.
9. Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов. – М.: Высш. школа, 1978. – 447 с.
10. The Use Of Synthetic Materials In The Highway Engineering In The Urals / A.A. Bartolomey, V.I. Kleveko, V.G. Ofrikhter, A.B. Ponomarev, A.N. Bogomolov // Geotechnical engineering for transportation

infrastructure: Proceedings of the 12th European conference on soil mechanics and geotechnical engineering / Ed. F.B.J. Barends, J. Lindenberg, H.J. Luger, L. Quelerij, A. Verruijt. – Netherlands. Amsterdam, 1999. – Vol. 2. – P. 1197–1202.

## **References**

1. Ponomarev A., Sychkina E. Settlement Prediction of Foundations on Argillite-Like Soils (as Exemplified by the Perm Region). *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2014, no. 51 (3), pp. 111-116. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11204-014-9263-y>
2. Tertsagi K. Stroitel'naia mekhanika grunta na osnove ego fizicheskikh svoistv [Construction soil mechanics on the basis of its physical properties]. Moscow: GOSSTROIIZDAT, 1933. 393 p.
3. Tsytovich N.A. Mekhanika gruntov [Soil mechanics]. Leningrad: Gosudarstvennoe izdatel'stvo stroitel'stoi literatury, 1940. 389 p.
4. Tertsagi K. Theoretical soil mechanics. New York, 1933. 510 p.
5. Ukhov S.B. Mekhanika gruntov, osnovania i fundamenti [Soil mechanics, bases and foundations]. Moscow: Vysshaya shkola, 2002. 566 p.
6. Boldyrev G.G. Metody opredeleniya mekhanicheskikh svoistv gruntov. Sostoianie voprosa [Methods for the determination of mechanical properties of soils. The state of the question]. Penza: Penzenskii gosudarstvennyi universitet arkhitektury i stroitel'stva, 2008. 696 p.
7. Ter-Martirosian Z.G. Reologicheskie parametry gruntov i rashchety osnovanii [Rheological parameters of soils and calculation bases of structures]. Moscow: Stroiizdat, 1990. 200 p.
8. Gol'shtein M.N. Mekhanicheskie svoistva gruntov [Mechanical properties of soils]. Moscow: Izdatel'stvo literatury po stroitel'stvu 1971. 368 p.
9. Vailov S.S. Reologicheskie osnovi mekhaniki gruntov [Rheological fundamentals of soil mechanics]. Moscow: Vysshaya shkola, 1978. 447 p.
10. Bartolomey A.A., Kleveko V.I., Ofrikhter V.G., Ponomarev A.B., Bogomolov A.N. The use of synthetic materials in the highway engineering in the Urals. *Proceedings of the twelfth European conference on soil mechanics and geotechnical engineering “Geotechnical engineering for transportation infrastructure”*. Amsterdam, Netherlands, 1999, vol. 2, pp. 1197-1202.

Получено 16.01.2015

### **Сведения об авторах**

**Колегова Лиана Юрьевна** (Пермь, Россия) – магистрант кафедры строительного производства и геотехники Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: lia-kolegova@yandex.ru).

**Офрихтер Вадим Григорьевич** (Пермь, Россия) – доцент кафедры строительного производства и геотехники Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: ofrikhter@mail.ru)

### **About the authors**

**Liana Iu. Kolegova** (Perm, Russian Federation) – Master student, Department of Building Production and Geotechnics, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: lia-kolegova@yandex.ru).

**Vadim G. Ofrikhter** (Perm, Russian Federation) – Associate Professor, Department of Building Production and Geotechnics, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: ofrikhter@mail.ru).